

夏玉米冠层内 PAR 截获及 $FPAR$ 与 LAI 的关系

周晓东, 朱启疆, 王锦地, 孙睿, 陈雪, 吴门新

(北京师范大学 资源与环境科学系 环境遥感与数字城市北京市重点实验室, 北京 100875)

摘要: 论文通过对河北栾城地区夏玉米生长期中晴天和阴天冠层中 PAR 的观测, 研究了入射 PAR 、玉米冠层的反射 PAR 、透过玉米冠层到达地表的 PAR 、地表的反射 PAR 、地表反射率、玉米冠层吸收的 PAR ($APAR$)、玉米冠层的反射率及地表反射率的日变化情况; 根据冠层中各 PAR 分量计算出一天中各时刻的 PAR 吸收系数 ($FPAR$) 和日平均值, 发现从玉米拔节期到灌浆期 $FPAR$ 和叶面积指数 (LAI) 之间有很好的线性关系, 其相关系数达 0.994。

关键词: 玉米; 冠层; PAR ; $FPAR$; LAI

中图分类号: S161 文献标识码: A 文章编号: 1000-3037(2002)01-0110-07

PAR (Photosynthetically Active Radiation) 是指能被绿色植物用来进行光合作用的那部分太阳辐射。目前, 大多数 PAR 研究所定的波段范围为 400~700nm。对 PAR 的量度, 通常采用两种计量形式。其一为能量学系统, 用 PAR 波段范围内的辐照度 (W/m^2) 来量度; 其二为量子学系统, 用光量子通量密度 ($\mu mol/m^2 \cdot s$) 来量度, 表征单位时间内在单位面积上入射的光量子数。

植物吸收的 PAR (Absorbed Photosynthetically Active Radiation $APAR$) 可通过入射 PAR 与植被对入射 PAR 的吸收比例或系数 ($FPAR$) 来求得。 $APAR$ 的研究是进一步研究植物的光合作用和光能利用率的基础, 植物的光合产物与所吸收的 $APAR$ 有着近似的线形关系^[1], 因此对 $APAR$ 和 $FPAR$ 的研究对植被净第一性生产力 NPP 监测和建模研究也具有重要意义。近年来, 随着遥感 NPP 模型的发展及对模型精度的要求, 机理过程模型和光能利用率模型开始出现。这两类模型的基础, 都是从植被生产力形成的生理过程出发, 根据植物对 PAR 的吸收、反射、透射及其在植被冠层内的传输, 结合植被生产力的生态影响因子, 与遥感信息之间建立数学模型。只有深入了解上述参数、叶面积指数 (LAI) 与遥感信息之间的关系, 才能建立更加精确的估测生物量的遥感模型。

国外对 PAR 的观测早在 20 世纪 60 年代就已进行^[2]。随着 PAR 观测仪器和技术的不断发展, 对 PAR 的研究也就越来越多^[3-6]。近年来国外有关 PAR 的研究主要集中在通过遥感数据对 $FPAR$ 进行反演, 并据此计算植被 NPP 来研究碳平衡问题^[7-10]。我国有关这方面的研究起步较晚, 刘洪顺^[11]最早于 1980 年对 PAR 进行了测定, 随后董振国等^[12]和周允华等^[13]分别对农田上的入射和反射 PAR 进行了测定。这些研究大多侧重于到达冠层上方的 PAR , 还没有系统地对作物冠层内 PAR 各分量、 $FPAR$ 与 LAI 的关系进行研究。而在大尺度的全球变化研究中, $FPAR$ 与 LAI 关系的定量表达式的建立已成为链接地面与卫星遥感数据的关键问题。为此, 笔者在河北栾城对夏玉米冠层内 PAR 各分量进行了测定, 对 $FPAR$ 与 LAI 的关系等进行了研究。

收稿日期: 2001-05-18; 修订日期: 2001-06-25。

基金项目: 国家自然科学基金 (49871055); 国家自然科学基金重点基金 (39990490); 国家重点基础研究发展规划 973 项目 (2000077906); 教育部博士点基金 (1999002713); 高校骨干教师资助计划资助。

第一作者简介: 周晓东(1973-), 男, 河南洛阳人, 北京师范大学博士生, 主要从事遥感应用和土地荒漠化方面工作。E-mail:xd_zhou@263.net

致谢: 在本研究的工作中, 中科院栾城农业生态试验站为实验提供了便利条件, 中科院地理所的项月琴研究员、莫兴国副研究员和林志辉为试验提供了实验仪器并给予了指导, 提出了很多宝贵意见, 在此表示由衷的感谢!

1 实验数据获取

试验样地设在中国科学院栾城农业生态系统试验站 (37°52'N, 114°39'E), 海拔高度为 50.5m, 土壤为壤土。样地大田内所种玉米品种为掖单 20 号, 2000 年 6 月 12 日播种。在 7 月 12~15 日以及 7 月 23 日、24 日对玉米冠层上方的入射 PAR、冠层的反射、到达地表的 PAR 及地表的反射进行了几天试观测, 并于 8 月 1 日到 8 月 27 日从玉米拔节期到灌浆期对以上四个量进行了连续观测。

1.1 测量仪器

试验中测定 PAR 所用的仪器是美国 Li-cor 公司生产的 LI-190 型光量子表, 它的波长范围为 400~700nm。该仪器通过一个模拟输出电路将所测的光信号转化为电压值, 这时可通过两种方式读取数据, 一种用数字式万用表直接读取, 另一种是通过数据采集器采集并由计算机输出, 最后根据光量子表所给出的标定系数将电压值转化为光量子通量密度。

1.2 测量方法

将两个点状光量子表置于玉米冠层上方分别测定到达冠层顶的 PAR 及冠层反射, 同时在地表以上玉米冠层以下将两个线状光量子表分别测定透过冠层到达地表的 PAR 和地表对透过冠层 PAR 的反射。

在试观测期间, 由于玉米还处在七叶期, 冠层叶片较稀疏, 为了使所测透过冠层 PAR 均一且有代表性, 在玉米地里斜置一条 3m 长的轨道, 使线状光量子表在轨道上来回移动以获取平均值为测定的透过冠层的平均 PAR。同时将一线状光量子表固定在玉米地上 10cm 处朝下测定地表对透过冠层的 PAR 的反射。数据采集使用万用表读数, 手工记录方式。从 7:00~19:00 每 1 小时整点观测一次。这样做虽然使所测透过冠层 PAR 均一, 有代表性, 但所获数据的同步性较差, 而且数据的时间连续性也不好。

在玉米拔节后, 冠层郁闭时, 将两只线状光量子表呈 90° (一只平行于垄, 一只垂直于垄) 固定在田间来测透过冠层的 PAR, 并改用数据采集器进行自记, 时间设置为从 7:00~19:00, 其步长为 15s, 每 5 分钟输出一个平均值。此时可看到两只表的读数相差不大, 说明透过冠层的 PAR 已经比较均一。

同时, 还对该大田夏玉米的 LAI 进行了测定。LAI 的测量与计算方法如下: 每次在大田随机选 4 个样点, 每个样点里连续取 4 株; 测量时依点将玉米分成 4 组, 记下每株的组号、株号, 从叶基处剪下每片叶子, 对每片叶子分 3 段测量长度及对应的宽度 (即叶基宽、最宽、次宽、叶基到最宽处的长度、叶基到次宽处的长度和叶总长); 根据上述的测量值, 将每片叶分三部分计算面积 (两个梯形和一个三角形), 从而得到整片叶的叶面积; 将上述 16 株的叶面积求平均, 得到平均单株叶面积; 最后根据在大田玉米的株距和行距计算出大田的 LAI; 观测日期从 7 月 9 日开始, 每旬观测一次, 在玉米拔节期加密观测。

2 实验数据处理

2.1 FPAR 的计算

到达作物冠层上方的入射 PAR, 一部分被作物冠层反射, 一部分被作物吸收, 一部分透射过冠层到达地表, 并被地表吸收和反射。只有被作物冠层吸收的 PAR 才对作物的干物质积累有贡献, 因此, FPAR 就是作物冠层对接受的所有 PAR 的吸收比例。其表达式为:

$$FPAR=1-\tau-\rho+\tau\rho_s \quad (1)$$

式中, τ 为作物冠层对 PAR 的透射系数, ρ 为作物冠层对入射 PAR 的反射率, ρ_s 为土壤表面对透过作物冠层 PAR 的反射率。这些系数可分别由以下几式求得

$$\tau=T/S \quad (2)$$

$$\rho=R/S \quad (3)$$

$$\rho_s=U/T \quad (4)$$

式中, T 为透过作物冠层到达地表的 PAR, S 为作物冠层上方的入射 PAR, R 为作物冠层对入射 PAR 的反射, U 为地表对透过冠层的 PAR 的反射。

2.2 APAR 的计算

APAR 可以由下式求得

万方数据

$$\begin{aligned} APAR &= S \cdot FPAR = S (1 - \tau - \rho + \tau\rho_s) \\ &= S - T - R + U \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $\tau\rho_s$ 的值很小(本实验中, 其值在 0.05~0.005 左右), 在玉米拔节后后期冠层郁闭时, 其值往往可以忽略不计。因此, 在实际计算 $APAR$ 时, 可用下式计算:

$$\begin{aligned} APAR &= S \cdot FPAR = S(1 - \tau - \rho) \\ &= S - T - R \end{aligned} \quad (6)$$

3 结果与分析

3.1 冠层上方入射 PAR 量 S 和冠层对入射 PAR 的反射量 R

图 1 为一个阴天(8月4日)和一个晴天(8月16日)的玉米冠层上方入射 PAR 量及冠层对 PAR 反射量的日变化图, 这两天分别处于玉米的拔节后后期和灌浆初期。从图中可以看出, S 从早晨开始升高, 到中午 12:30 左右达到最高, 所观测到的晴天最大 PAR 约为 $1600 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$, 下午则开始降低。晴天时 S 的日变化呈标准的正弦曲线, 上午和下午的曲线对称, 曲线比较光滑; 阴天时由于云变化的影响, 故曲线波动也较大。 R 的日变化趋势和 S 的日变化趋势完全一样, 其值随 S 的增加而增加、减小而减小, 说明冠层的反射与它接受的入射呈很好的正比关系。

3.2 透过玉米冠层的 PAR 量 T 和地表对透过玉米冠层的 PAR 量的反射 U

图 2 为 8 月 4 日、8 月 16 日两天透过玉米冠层的 PAR 和地表对透过玉米冠层 PAR 的反射量日变化图。从图中可以看出, 透射 PAR 日变化与冠层上方入射 PAR 的日变化的总体趋势是一致的, 也是从早晨开始升高, 到中午达到最高, 然后就开始降低, 在入射 PAR 日变化出现波峰波谷的时刻, 透射 PAR 日变化同样出现波峰波谷。从两个晴天的图上可以看出, 透射 PAR 的日变化并不是很平滑的正弦曲线, 而是在中午前后透射值突然增大, 这也与太阳的入射角度及 PAR 入射强度有关, 入射角越小, 入射 PAR 的强度越大, 则透过冠层的 PAR 也就越多, 这同样也验证了后面所得玉米冠层对入射 PAR 的反射率日变化规律, 即早上和傍晚较大、中午较小。从冠层对透射 PAR 反射量的日变化情况来看, 其变化趋势和透射 PAR 的日变化趋势是完全一样的, 说明它们之间存在着类似于冠层的反射和它接受的入射之间的正比关系。

图 2 为 8 月 4 日、8 月 16 日两天透过玉米冠层的 PAR 和地表对透过玉米冠层 PAR 的反射量日变化图。从图中可以看出, 透射 PAR 日变化与冠层上方入射 PAR 的日变化的总体趋势是一致的, 也是从早晨开始升高, 到中午达到最高, 然后就开始降低, 在入射 PAR 日变化出现波峰波谷的时刻, 透射 PAR 日变化同样出现波峰波谷。从两个晴天的图上可以看出, 透射 PAR 的日变化并不是很平滑的正弦曲线, 而是在中午前后透射值突然增大, 这也与太阳的入射角度及 PAR 入射强度有关, 入射角越小, 入射 PAR 的强度越大, 则透过冠层的 PAR 也就越多, 这同样也验证了后面所得玉米冠层对入射 PAR 的反射率日变化规律, 即早上和傍晚较大、中午较小。从冠层对透射 PAR 反射量的日变化情况来看, 其变化趋势和透射 PAR 的日变化趋势是完全一样的, 说明它们之间存在着类似于冠层的反射和它接受的入射之间的正比关系。

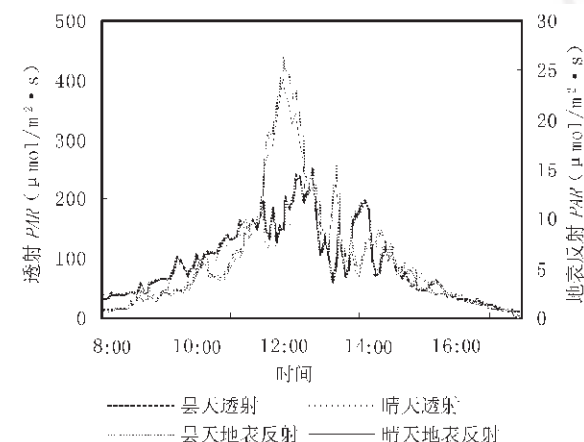


图 2 透射 PAR 和地表反射 PAR 的日变化图
Fig.2 Diurnal change of the transmitted PAR and the reflected PAR over land surface

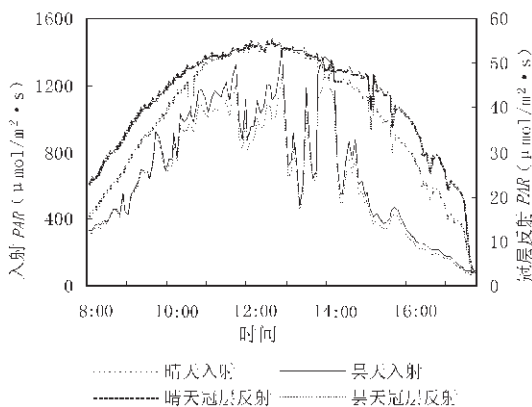


图 1 入射 PAR 和玉米冠层反射 PAR 的日变化图

Fig.1 Diurnal change of the incident PAR and the reflected PAR of summer maize canopy

3.3 玉米冠层反射率 ρ 和地表反射率 ρ_s

图 3 为 8 月 4 日和 8 月 16 日两天的玉米冠层对入射 PAR 的反射率和地表对透射 PAR 的反射率日变化图。从图中玉米冠层对入射 PAR 反射率的日变化曲线看, 反射率的日变化幅度不大, 其值在早上和傍晚时较大, 中午时较小, 晴天冠层反射率的日变化幅度明显要大于阴天的。这些与太阳的入射角度及 PAR 入射能量组成有关, 当早晚太阳高度角

小时,入射 PAR 中的直射能量所占比例较小,而散射能量所占比例较大,随着太阳高度角的增加直射能量所占比例也随之增加,到中午时达到最大,由于冠层对直射能量的反射率比散射能量的反射率小,这就出现了本实验所观测冠层对 PAR 反射率的日变化规律。

从图 2 中可看出,透过冠层的 PAR 与地表反射的 PAR 日变化趋势完全一致。因此从理论上说,地表对入射 PAR 的反射率在一天中应该近乎于一个常数,这就出现了图 3 中的结果。而在图 3 中,晴天的地表反射率基本上维持在 0.055 左右,云天的地表反射率则波动较大,其值在 0.05 和 0.065 之间变化,两者相比较而言,晴天的地表反射率更稳定、更近似一常数。很多研究表明^[14],地

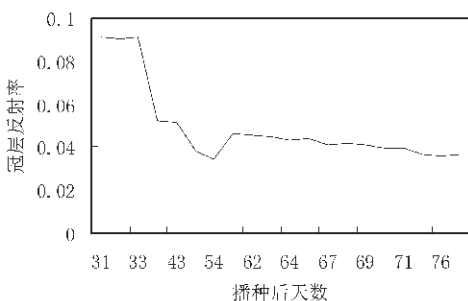


图 4 冠层日平均反射系数随发育期的变化图

Fig.4 Change of daily average reflectance of canopy in different growing periods

3.4 玉米冠层所吸收的 PAR ($APAR$) 和 PAR 吸收系数 ($FPAR$)

图 5 为 8 月 4 日和 8 月 16 日两天的玉米冠层所吸收 PAR 及 PAR 吸收系数的日变化图。从图中可以看出, $APAR$ 的日变化趋势和入射 PAR 的日变化趋势基本一致,说明玉米冠层所吸收 PAR 与它所接受的入射也有很好的线性关系,同样也说明利用 $FPAR$ 与入射 PAR 求 $APAR$ 是科学的。从晴天玉米冠层所吸收 PAR 的日变化情况看, $APAR$ 的日变化基本是平滑的正弦曲线,只是在中午前后 $APAR$ 突然减小,这是由于太阳入射角减小,玉米冠层的反射率减小,反射 PAR 也随之减小,进而导致中午前后透过冠层的 PAR 突然增大,这正好与前面所得玉米冠层反射率及

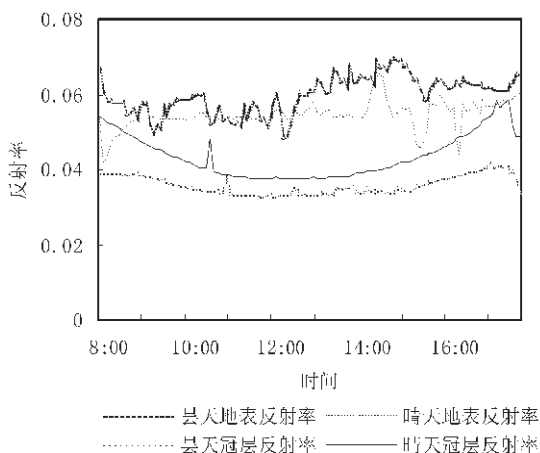


图 3 玉米冠层反射率和地表反射率的日变化图

Fig.3 Diurnal change of the reflectance in canopy and land surface

表的反射率受土壤含水量的影响较大,含水量越大,则其反射率越小。

图 4 为玉米冠层日平均反射率随发育期(从拔节初期到灌浆期)的变化图。在玉米叶片没有完全覆盖地表时,所测的冠层反射实际是玉米叶片和地表的共同作用,而这时的冠层反射率也就受玉米叶层和地表的共同影响,且很大程度受地表反射率的影响,因而数值较大;另外,从图中可以看到在播种后第 54 天前冠层反射率有一个异常的下降,这是由于这几天因灌溉而使土壤湿度突然增加,进而导致土壤的反射率减小所造成的;当玉米叶片完全覆盖地表时,冠层的反射率主要受玉米叶层的影响,比较图 4 和图 6,可以看出冠层反射率随着玉米叶面积指数的增加而减小。

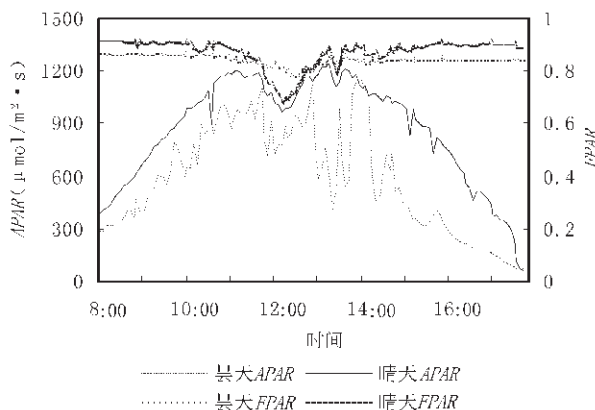


图 5 玉米冠层 APAR 和 FPAR 的日变化图

Fig.5 Diurnal change of APAR and FPAR in canopy

透射 PAR 的日变化规律相对应。

从图中玉米冠层对 PAR 吸收系数日变化情况看, 无论晴天还是阴天, $FPAR$ 的日变化规律都是一样的, 在上午和下午时 $FPAR$ 基本不变, 而在中午前后有一个减小的过程, 只是晴天时 $FPAR$ 减小的幅度比阴天时要大得多。这也正与 $APAR$ 的日变化规律相对应, 晴天中午时直射能量占总辐射能量的比例要大于阴天的, 透过玉米冠层的比例相应就大于阴天的, 因此, 晴天的 $FPAR$ 减小幅度也就大于阴天的。

为了研究玉米叶面积指数与 $FPAR$ 的关系, 必须得到 $FPAR$ 观测期相对应的叶面积指数, 而观测叶面积指数只是在玉米的几个主要发育阶段进行, 因此需要通过内插得到相应的叶面积指数。由于作物的叶面积指数变化曲线是 logistic 生长曲线形式^[5], 因此可以根据 LAI 的实测值, 按照 logistic 生长曲线来模拟玉米的叶面积指数。图 6 为玉米 LAI 实测值与模拟值的比较, 下式为 LAI 的 logistic 生长曲线

$$LAI = LAI_{\max} / [1 + \exp(-a + bX)] \quad (7)$$

式中, LAI_{\max} 为玉米生长期内达到的最大叶面积指数, X 为播种后的天数; a, b 是根据实测 LAI 所拟合出的系

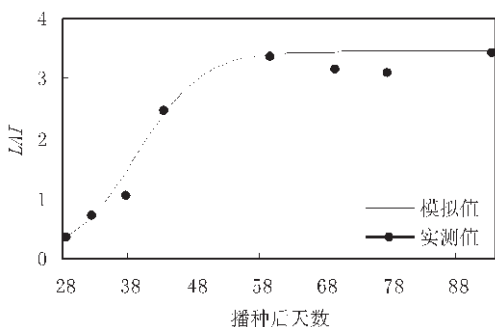


图 6 玉米实测 LAI 与模拟 LAI 的比较

Fig.6 Comparison of simulated LAI and observed LAI

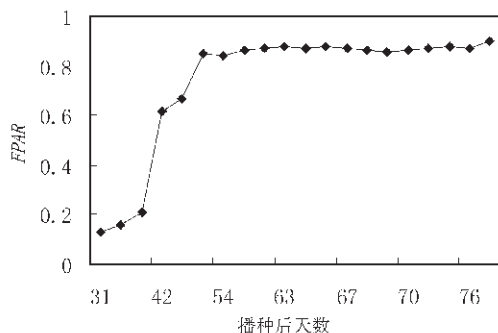


图 7 $FPAR$ 随发育期的变化

Fig.7 Change of $FPAR$ in different growing periods

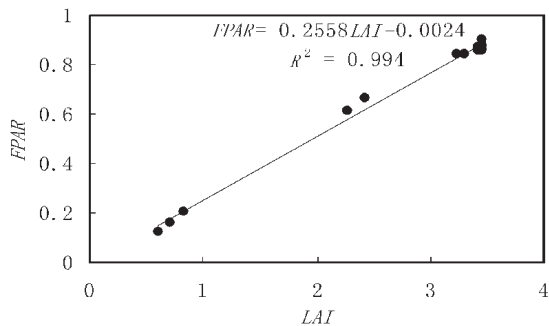


图 8 玉米冠层 $FPAR$ 与 LAI 之间的关系

Fig.8 Relationship between $FPAR$ and LAI

数, 它们分别为 7.82 和 -0.20。从图 8 可以看出, 利用此式模拟 LAI 的效果很好。根据式 (7), 可得出与 $FPAR$ 观测期相对应的叶面积指数, 进而能够研究玉米 LAI 与其 $FPAR$ 之间的关系。

图 7 为观测期内玉米每天的日平均 $FPAR$ 随发育期的变化图。从图 6 和图 7 中可以看出, LAI 、 $FPAR$ 随发育期变化的规律和趋势完全一致, $FPAR$ 随着玉米 LAI 的增大而增大, 直到 LAI 不再增大而趋于稳定, 说明两者之间存在线性关系。对 LAI 与 $FPAR$ 进行线性拟合 (图 8), 得到它们之间的线性关系式, 两者之间的拟合相关系数达到 0.994。

$$FPAR = 0.2558 LAI - 0.0024 \quad (8)$$

4 结论与讨论

(1) 玉米冠层上方入射 PAR 和冠层对入射 PAR 的反射量的日变化趋势完全一样, 晴天时的日变化曲线呈标准的正弦分布, 上午和下午的曲线对称, 曲线比较光滑; 阴天时由于有较多云的影响, 故曲线波动较大。

(2) 冠层反射率的日变化受太阳入射角度和 PAR 入射能量组成的影响较大。在早上和傍晚时, 太阳入射角大, 且入射 PAR 中的直射能量所占比例较小, 而散射能量所占比例较大, 其反射率较大, 中午前后

太阳入射角小,且入射 PAR 中的直射能量所占比例较大,而散射能量所占比例较小,其反射率较小,晴天冠层反射率的日变化幅度明显要大于阴天;冠层的反射率在玉米叶片完全覆盖地表时主要受玉米叶层的影响,随着玉米叶面积指数的增加而减小。

(3)透过冠层的 PAR 与地表反射的 PAR 日变化趋势也完全一致,地表对透过冠层 PAR 的反射率在一天中接近常数,晴天的反射率比阴天的更稳定。

(4)玉米冠层所吸收的 PAR ($APAR$) 的日变化趋势与入射 PAR 的日变化趋势类似,是近乎于平滑的正弦曲线,只是由于中午前后透过冠层的 PAR 突然增大导致 $APAR$ 有一个减小的过程,且晴天时减小的幅度比阴天时要大得多;对于 $FPAR$ 而言,无论晴天还是阴天,其日变化规律都是一样的,在上午和下午时基本不变,而在中午前后有一个波谷。

(5)根据 LAI 的实测值,按照 logistic 生长曲线模拟出玉米的叶面积指数,发现从拔节期到灌浆期玉米的 LAI 和 $FPAR$ 随发育期变化的规律和趋势完全一致, $FPAR$ 随着玉米 LAI 的增大而增大,直到 LAI 不再增大而趋于稳定,说明两者之间存在线性关系,据此拟合出线性关系式的相关系数达到 0.994。

参考文献:

- [1] Mecree K J.A solarimeter for measuring photosynthetically active radiation[J]. Agri. Meteor.,1966,3:353~366.
- [2] 刘洪顺.PAR 的观测和计算[J].气象,1980,6:5~6.
- [3] Mecree K J. Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data[J].Agri. Meteorol.,1972,10:443~453.
- [4] Stanhill G, Fuchs M. The relative flux density of photosynthetically active radiation[J]. J. Appl. Ecol. ,1977,14: 317~322.
- [5] Hipps L E, Asrar G, Kanemasu E T. Assessing the interception of photosynthetically active radiation in winter wheat[J]. Agri.Meteorol.,1983,28:253~259.
- [6] Gallo K P, Daughtry C S T. Techniques for measuring intercepted and absorbed photosynthetically active radiation in corn canopies[J]. Remote Sens. Environ.,1986,17:221~232.
- [7] Prince S D. A model of regional primary production for use with coarse-resolution satellite data[J]. Int.J. Remote Sens., 1991,12:1313~1330.
- [8] Epiphanio J C N, Huete A R. Dependence of NDVI and SAVI on sun/sensor geometry and its effect on fAPAR relationships in Alfalfa[J]. Remote Sens. Environ., 1995,51:351~360.
- [9] Roujean J L, Breon E M. Estimating PAR absorbed by vegetation from bi-directional reflectance measurements[J]. Remote Sens. Environ.,1995,51:375~384.
- [10] Huemmrich K F,Goward S N.Vegetation canopy PAR absorbed and NDVI:An assessment for ten tree species with the SAIL Model[J]. Remote Sens. Environ.,1997,61:254~269.
- [11] 董振国,于沪宁.农田 PAR 观测与分析[J].气象,1983,7:23~24.
- [12] 周允华.PAR 的测量[A].中科院北京农业生态系统试验站.农田作物环境实验研究[C].北京:气象出版社,1990.
- [13] 周允华,项月琴,等.地球表层辐射平衡研究[M].北京:科学出版社,1991.
- [14] 董振国,于沪宁.农田作物层环境生态[M].北京:中国农业技术出版社,1994.
- [15] 彭宁德弗里斯,等(朱德峰,程式华,等译)几种一年生作物生长的生态生理过程[M].北京:中国农业科技出版社,1991.

Interception of *PAR*, relationship between *FPAR* and *LAI* in summer maize canopy

ZHOU Xiao-dong, ZHU Qi-jiang, WANG Jin-di, SUN Rui, CHEN Xue, WU Men-xin
(Department of Geography, Beijing Normal University, Beijing Key Lab. for Remote Sensing of Environment and Digital Cities, Beijing 100875, China)

Abstract: On the basis of an observation to summer maize canopy *PAR* during growing period at Luancheng, Hebei, the incident *PAR*, the reflective *PAR* of the canopy, the *PAR* reached the land surface through canopy, the reflective *PAR* of the land surface, the reflectance of land surface, the Absorbed Photosynthetically Active Radiation (*APAR*) and the reflectance diurnal change of the canopy and land surface under clear and cloudy conditions respectively were studied in this paper. Also, the *FPAR* at an interval of five minutes and the average value of a day were calculated according to each *PAR* components in canopy. Then the relationship between daily variation of *FPAR* and crop growth periods as well as the variation of *LAI* were examined and a linear relationship between *FPAR* and *LAI* was presented.

Key words: summer maize; canopy; *PAR*; *FPAR*; *LAI*

田 万方数据
WANFANG DATA